



Modélisation géomatique rétrospective des paysages par évaluation multicritères et multiobjectifs

Maria T. Camacho Olmedo, Martin Paegelow, Pilar Garcia Martinez

► To cite this version:

Maria T. Camacho Olmedo, Martin Paegelow, Pilar Garcia Martinez. Modélisation géomatique rétrospective des paysages par évaluation multicritères et multiobjectifs. *Cybergeographie : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2007, 365, 24 p. en ligne. halshs-01063425

HAL Id: halshs-01063425

<https://shs.hal.science/halshs-01063425>

Submitted on 12 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation géomatique rétrospective des paysages par évaluation multicritères et multiobjectifs

Retrospective geomatic landscape modelling by multicriteria evaluation and multiobjective evaluation

María Teresa Camacho Olmedo *
Instituto de Desarrollo Regional
Universidad de Granada

Martin Paegelow **
GEODE UMR 5602 CNRS
Université de Toulouse - Le Mirail

Pilar García Martínez *
Dpto de Territorio y Patrimonio Histórico
Universidad de Jaén

* Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Granada, Edificio Centro de Documentación Científica, 3^è planta C / Rector Lopez Argueta s/n E-18071 Granada, camacho@platon.ugr.es

** GEODE UMR 5602 CNRS, Maison de la Recherche, 5, all. A. Machado, F-31058 Toulouse cedex 9
paegelow@univ-tlse2.fr

Résumé

Parmi les fonctions SIG pour la modélisation spatio-temporelle et l'aide à la décision, l'évaluation multicritères et multiobjectifs s'avèrent être particulièrement utile en ce qui concerne la reproductibilité des résultats et le paramétrage de scénarii en termes de prise de risque et de compensation. Ce travail illustre la méthodologie et les résultats obtenus pour la reconstitution probabiliste du paysage historique de la Alta Alpujarra Granadina (Sierra Nevada, Espagne) du 16^{ème}, 18^{ème} et 19^{ème} siècle.

L'évaluation multicritères génère des cartes de potentialité – ou d'aptitude – pour chaque usage (objectif), en l'occurrence les différentes catégories d'occupation du sol. Elle se base sur l'hypothèse qu'il existe, pour une date donnée, une série de critères spatialisés pouvant expliquer la variabilité des états de la variable (catégories d'occupation du sol), autrement dit l'aptitude pour un usage. L'évaluation multiobjectifs consiste, en tenant compte des superficies réellement occupées, à intégrer les objectifs concurrents (cartes d'aptitude monothématiques) afin de construire les cartes probabilistes d'occupation du sol historiques pour 1572, 1752 et 1855/61. Les résultats expriment la probabilité de présence d'une occupation du sol à un endroit donné selon les critères inclus dans l'analyse. Leur interprétation permet de se prononcer sur les apports et limites de la méthodologie mise en œuvre sans pour autant autoriser une validation faute de documents historiques de comparaison.

Mots-clés : Système d'information géographique, modélisation, paysage historique, évaluation multicritères, évaluation multiobjectifs.

Resumen

La evaluación multicriterio y la evaluación multiobjetivo se han erigido como unas de las funciones más versátiles de los Sistemas de Información Geográfica por las posibilidades que brindan para el análisis multivariable y la toma de decisiones. En este trabajo se muestran los resultados de la utilización de estos módulos para la reconstrucción del paisaje histórico de un

área geográfica, la Alta Alpujarra Granadina (Andalucía, España) de la que se posee una amplia y dilatada base estadística de los usos del suelo agrarios (S.XVI, S.XVIII, S.XIX).

La evaluación multicriterio permite obtener una serie de mapas de potencialidad para cada uno de los usos del suelo partiendo de la hipótesis de que existen una serie de criterios condicionantes para la mayor o menor aptitud del territorio a acoger una actividad o uso agrario. Posteriormente, la evaluación multiobjetivo resuelve las incompatibilidades entre los usos potenciales para cada una de las fechas analizadas (1572, 1752, 1855/61), y reconstruye los mapas estocásticos históricos teniendo en cuenta la superficie que ocupaba cada uso agrario según la base estadística. El resultado muestra la probabilidad de que un determinado uso o actividad se localice en un sector en función de las variables incluidas en el análisis, y ofrece la posibilidad de evaluar los límites y las aportaciones de la metodología utilizada sin embargo autorizar una validación por falta de documentos históricos de comparación.

Palabras Clave: Sistemas de Información Geográfica, modelización, paisaje histórico, evaluación multicriterio, evaluación multiobjetivo.

Abstract :

Geographic information systems includes among the variety of analytical functions those intended to spatial-temporal modelling and decision support, particularly multi-criteria evaluation and multi-objective evaluation. These tools are particularly useful for simulation scenarios because of reproducibility of results and the possibility to define the amount of trade off and risk in the decision process. This paper focuses on methodology and results obtained for retrospective land cover modelling in the Alpujarra Alta Granadina (Andalusia, Spain), related to a knowledge database about land cover dynamics up from the XVI century to XX century.

Multi-criteria evaluation produces a lot of land use potential maps, also called suitability maps, one for every objective (land use category). It is based on a chronological set of land use maps, and criteria which are considered responsible for the observed changes and aptitude to receive an agriculture use. After that, the multi-objective evaluation resolves the incompatibilities between the potential uses for the chronological set (1572, 1752, 1855/61), and rebuilt probabilistic historical maps based in the statistical surfaces. The results show the probable location for a specific use and allow to test the methodology and to specify some contributions and limits without for it permitting a validation for lack of historic comparable documents.

Key-words: Geographic information systems, modelling, historic landscape, multi-criteria evaluation, multi-objective evaluation.

Introduction et objectifs

Depuis une dizaine d'années les approches méthodologiques en matière de modélisation, applicables à des dynamiques environnementales et paysagères, mûrissent et se diversifient, comme en témoigne l'ouvrage de Coquillard et Hill (Coquillard et Hill, 1997), bien qu'encore peu présentes dans les SIG (Banos, 2001).

Généralement appliquée dans une finalité prospective, la modélisation – il conviendrait plutôt de parler de simulation dans la mesure où le comportement modélisé est immergé dans le temps – s'appuie, schématiquement, soit sur des outils stochastiques comme des chaînes de Markov ou encore des modèles logistiques (López et al., 2001 ; Stefanakis, 2003), soit sur des modèles à base d'intelligence artificielle : automate cellulaire, multi-agents (quoique

d'avantage employés dans le cadre d'études urbaines) et réseaux neuronaux (Li et Yeh, 2002 ; Barredo et al., 2003 ; Mas et al., 2004 ; Manson, 2005 ; Soares-Filho et al., 2005 et 2006), parfois couplés à la logique floue.

Les auteurs, inscrits dans plusieurs programmes de recherche portant sur la modélisation de dynamiques environnementales variables en vitesse et sens, utilisent la plupart de ces approches modélisatrices afin de concevoir un modèle intégré, robuste et généralisable (Ferraty et al., 2005 ; Follador et al., 2006 ; Paegelow et Camacho Olmedo, 2005).

La comparaison des résultats obtenus par plusieurs modèles (Paegelow et al., 2004), appliqués à différents espaces, montre pour les terrains caractérisés par une forte dynamique spatio-temporelle, des meilleurs résultats (validation par la dernière date connue et non utilisée dans les modèles) pour un modèle dont les probabilités de transitions temporelles sont obtenues par chaînes de Markov et dont la localisation est assistée par l'évaluation multicritère (Villaneix et al., 2006).

L'évaluation multicritère est une méthode couramment utilisée pour l'aide à la décision (Gómez-Delgado et Tarantola, 2006 ; Malczewski, 2006), voire considérée comme la méthode la plus importante dans ce domaine (Jiang et Eastman, 2000).

Le travail exposé ici se base sur l'emploi de l'évaluation multicritère (EMC) et de l'évaluation multiobjectifs (EMO), qui n'est qu'une extension du concept d'EMC en présence de plusieurs objectifs concurrents, appliquées à la modélisation rétrospective de paysages. Peu d'études portent sur l'aspect rétrospectif de la modélisation (Murphy et van der Vaart, 2001). Quant à l'emploi de l'EMC, il est généralement cantonné à l'établissement de cartes d'aptitude dans divers domaines. La littérature internationale spécialisée ne fait pas état d'emploi de cette technique à des fins de modélisation rétrospective. Il en résulte que l'intérêt de cet exercice est d'abord d'ordre méthodologique, illustrant potentialités et limites de l'évaluation multicritères (EMC) et de l'évaluation multiobjectifs (EMO) appliquées à la modélisation historique de paysages ce qui est, à notre connaissance, novateur. A cet égard, ces travaux viennent en complément des recherches en modélisation prospective déjà citées, destinées à accompagner l'aide à la décision, la prévention de risques et l'aménagement.

L'étude présentée s'appuie sur des travaux antérieurs (Camacho Olmedo et al. 2003, 2004) et se focalise sur la modélisation rétrospective du paysage de la Alta Alpujarra Granadina (fig. 1). La modélisation rétrospective appliquée à des périodes historiques sans support cartographique ou autre document spatialisé permettant d'en déduire l'occupation du sol – en l'occurrence trois dates s'échelonnant du 16^{ème} au 19^{ème} siècle – induit un certain nombre de restrictions méthodologiques et de validation. La plupart des modèles requièrent une base de données de calibration spatialisant la variable étudiée alors que nous ne disposons pour ces dates que de sources statistiques. Par conséquent, nous nous limitons ici aux seules techniques d'évaluation multicritères et multiobjectifs. Une autre restriction de notre approche est l'impossibilité de valider les résultats calculés. Si, en modélisation prospective, on peut valider la simulation obtenue sur la base d'une période d'entraînement antérieure (calibration) par la date la plus récente connue, il n'en est pas de même pour notre étude faute de documents de référence. En effet, le premier document spatialisé (photographie aérienne) date de 1957, soit à peu près un siècle après la date de modélisation la plus récente (autour de 1860). Sachant que la carte d'occupation du sol de 1957 correspond à la phase d'extension maximale des cultures agricoles, nous prenons appui, entre autres, sur celle-ci pour le paramétrage du modèle. A défaut d'une validation nous ne pouvons que nous borner à une comparaison entre les occupations du sol historiques modélisés et cette carte de référence du milieu du 20^{ème} siècle. Encore, cette comparaison peut paraître biaisée du fait que l'occupation du sol de 1957 est connue par le modèle même si son poids est faible. Etant

dans l'impossibilité de valider le modèle, cette comparaison cherche à mettre en évidence forces et faiblesses de la démarche. En effet, il nous semble que la question la plus intéressante porte toujours sur ce qui « échappe » au modèle, autrement dit quels sont les territoires et les dynamiques auxquels le modèle n'apporte pas de réponse et pourquoi.

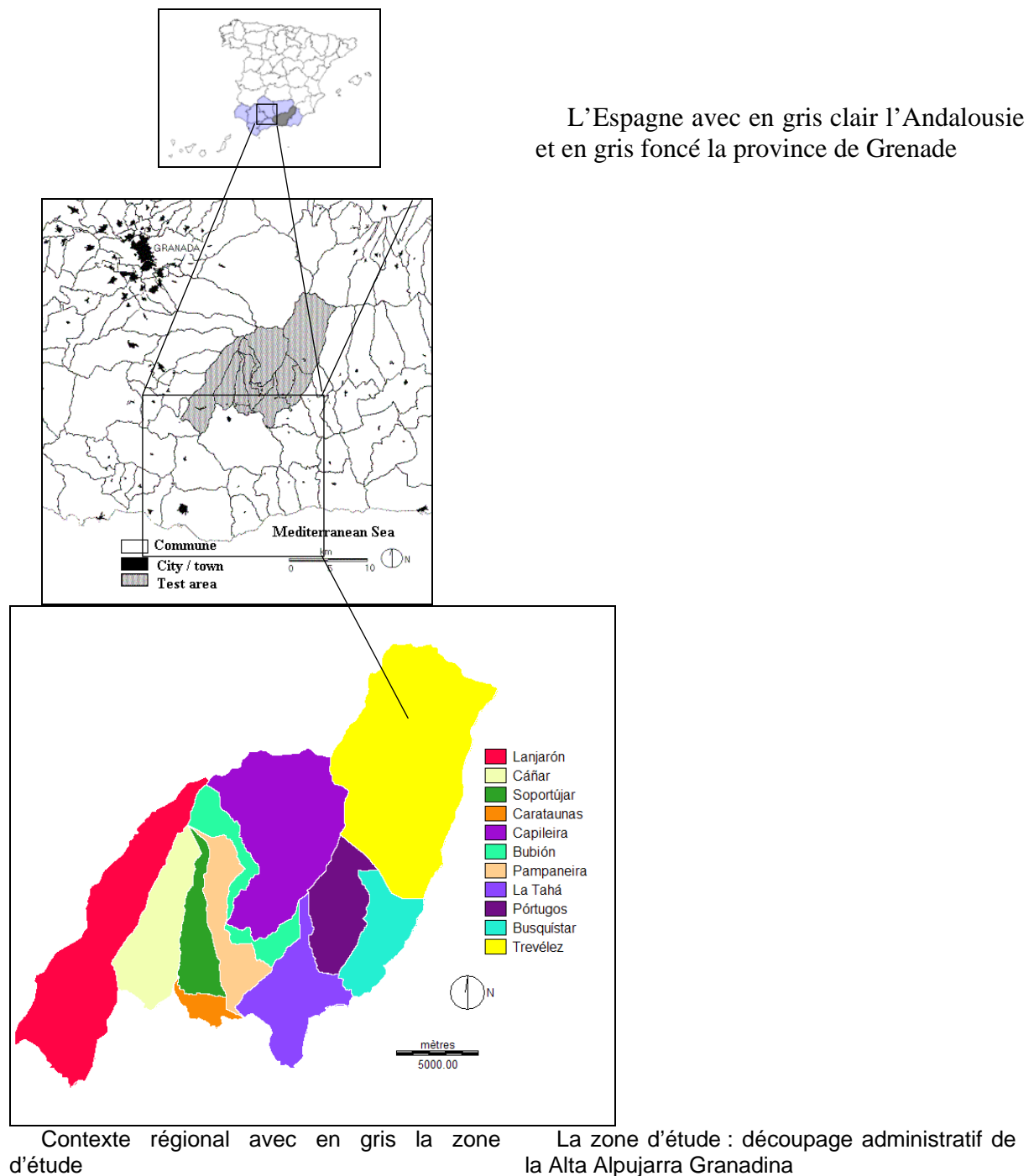


Figure 1: Localisation de la zone d'étude et limites communales

Les techniques appliquées prennent en compte un nombre important de critères (spatialisés) influant sur l'occupation du sol et résolvent les conflits entre usages potentiels

(Barredo, 1996) pour la reconstruction du paysage historique. Les cartographies obtenues par cette modélisation n'expriment qu'un degré de probabilité que, en un lieu donné et à chacune des dates traitées, un état de la variable se réalise sachant que chacun des états (discrets) est conditionné par une série de critères considérés constants au cours de la période analysée. Les techniques utilisées donnent lieu à des cartes d'aptitude. Bien qu'appliquée à l'usage du sol, nous employons le terme *aptitude* tel qu'il est compris dans les procédures d'aide à la décision et en tant que traduction du terme anglais *suitability*. Par conséquent, il exprime un potentiel ou une probabilité, pour l'objectif stipulé, et ne doit, en aucun cas, être confondue avec la notion d'aptitude agraire.

Il en découle que les cartes historiques calculées doivent être interprétées plutôt comme une approximation du paysage historique qu'une reconstitution fidèle de la réalité historique.

La référence historique – et le point de départ de cette tentative de modélisation historique – est la cartographie de l'occupation du sol la plus ancienne connue, obtenue par photo-interprétation, celle de 1957. A cela s'ajoutent des données statistiques extraites de différentes sources historiques du 16^{ème}, 18^{ème} et 19^{ème} siècles (García Martínez, 1999) qui, à défaut d'une localisation exacte, permettent de préciser les superficies historiques réellement occupées à l'échelle communale.

L'état lacunaire et la fiabilité dans le détail des statistiques – plus ou moins fines en termes de catégories d'occupation du sol recensées – couplés à un redécoupage administratif (certaines communes furent agrégées dans le passé), et l'impossibilité matérielle de modéliser la très grande diversité des cultures agricoles, actuelle ou dans le passé, nous conduisent à réduire l'exercice aux deux grandes catégories des terres agricoles en zone aride : les terres irriguées (*regadío*) et terres non irriguées (*secano*) que nous appellerons par leur nomcastillan.

Sources cartographiques et statistiques

Sources cartographiques : base de données géoréférencées

La base de données géoréférencées englobe la cartographie de l'occupation du sol pour les années 1957, 1974, 1987 et 2001, obtenue par interprétation de photographies aériennes panchromatiques, cartes thématiques existantes et cartographie de terrain. A cela s'ajoute un ensemble de plans d'information descriptifs et explicatifs de l'évolution paysagère retracée (MNT et dérivés, hydrographie et canaux d'irrigation, statut de propriété, terrasses de cultures, voies de communication, habitats, ...). Ces données, à l'échelle du 1 : 25 000, ont été rasterisées pour cette étude avec une résolution du pixel de 25 m et traitées sous Idrisi Kilimanjaro pour calculer les cartes d'aptitude multicritères.

Sources statistiques historiques : cultures et occupation du sol aux 16, 18 et 19^{èmes} siècles

Les données permettant de préciser les cultures agricoles et, de manière plus générale, l'occupation du sol dans les communes de la Alta Alpujarra aux 16^{ème}, 18^{ème} et 19^{ème} siècles ont été extraites de plusieurs sources historiques (García Martínez, 1999) ayant une nomenclature très détaillée¹. Il va sans dire que la diversité et la fiabilité des sources historiques ont nécessité maints croisements et des prétraitements critiques – un des axes les plus importants de la thèse de García Martínez. Pour des raisons de clarté et compte tenu aussi bien de la nomenclature des cartes d'occupation du sol de la seconde moitié du 20^{ème} siècle que des incohérences entre les sources utilisées, nous résumons cette diversité en deux catégories – terres irriguées (*regadío*) et terres non irriguées (*secano*) – bien que conscients de

la complexité et de la variété des situations présentes dans ce paysage agraire millénaire. Cette hétérogénéité, inhérente à ces deux catégories générales, est d'autant plus importante qu'il s'agit de calculer une carte d'aptitude unique pour chacun des deux usages qui, en réalité, présentent une multitude de faciès. Ceci est le cas, par exemple, des cultures irriguées de *vega*, localisées proches des villages, et de *sierra*, situées sur des versants à des altitudes plus élevées – une différenciation altitudinale également valable pour les cultures non irriguées. D'ailleurs, cette distinction demeure perceptible dans la cartographie de l'occupation du sol de la seconde moitié du 20^{ème} siècle qui montre, d'une part, des terres cultivées appartenant aux catégories mentionnées ci-dessus, et, d'autre part, des traces d'une activité agricole récente sans recolonisation végétale ce qui nous a amené à les classer en tant que cultures abandonnées. En ce qui concerne les surfaces non cultivées, l'information déductible des diverses sources historiques est beaucoup plus réduite et imprécise. Pour cette raison, nous avons choisi de ne pas tenir compte de ces données sommaires pour la modélisation. Elles ont été regroupées en une seule catégorie – terres non cultivées et/ou non agricoles – qui correspond à la différence de la surface totale de la commune moins les terres agricoles de regadío et de secano.ⁱⁱ

Chaque document historique présente des apports et des limites spécifiques. Celui utilisé pour 1572 (Libros de Apeos y Repartimientos) contient les données suivantes : le nombre de colons arrivés dans la Alta Alpujarra suite à l'expulsion des Maures, le nombre de *suertes*, un terme qui signifie approximativement « titre de propriété / lot de terres », réparties entre eux et les caractéristiques de la *suerte tipo* (spécifiant la composition et l'extension du lot de terres attribué par la couronne espagnole suite à la reconquête) qui, en fonction des instructions de repeuplement, varie en extension et nature d'une commune à l'autre. (cf. annexes 1 et 2).

Pour le 18^{ème} siècle, le cadastreⁱⁱⁱ constitue la source incontournable pour chiffrer la distribution des cultures (cf. annexe 3). Le cadastre indique les surfaces des terres cultivées, irriguées ou non, et des terres non cultivées et / ou non agricoles par commune. Ces données cadastrales sont focalisées sur les terres cultivées, sujettes à l'imposition, tandis que les autres terres donnent lieu à des estimations moins précises et douteuses, ce qui explique la différence entre la surface cadastrale actuelle et celle de 1752, nettement inférieure^{iv}. C'est notamment le cas de Trevélez (cf. tab.1) dont la majeure partie de la commune se situe en haute montagne.

Enfin, les données cadastrales recueillies entre 1855 et 1861 (cf. annexe 4) montrent l'extension des terres cultivées sans se préoccuper des terres non agricoles. La finalité de la source – l'imposition – explique que toutes les terres non cultivées ont été classées comme terres incultes. Néanmoins, la surface cultivée totale serait plus importante car des cultures, notamment non irriguées, marginales ou ayant un caractère non permanent n'ont pu être comptabilisées dans leur ensemble (García Martínez, 1999). En somme, il s'agit d'une source historique davantage apte à rendre compte de la structure de la propriété que de la distribution des cultures pour lesquelles les termes utilisés sont souvent assez vagues. Enfin, il s'agit de données lacunaires dans la mesure où quatre des onze communes de la Alta Alpujarra Granadina n'ont pas été recensées.

L'ensemble des données est résumé dans la tableau 1 : surfaces (en ha) des cultures irriguées, regadío, et non irriguées, secano, des onze communes de la zone d'étude pour chaque date et la surface communale totale (selon la base de données localisées SIG).

Commune	1572		1752		1855/61		Surface municipale
	Regadío	Secano	Regadío	Secano	Regadío	Secano	
Lanjarón	65.53	317.51	173.17	354.78	602.53	209.77	6019.63
Cáñar	67.78	88.15	425.20	123.65	-	-	2633.07
Soportújar	35.82	7.95	511.79	260.92	447.59	340.75	1411.38
Carataunas	24.54	6.13	39.39	110.24	-	-	465.53
Pampaneira	149.02	0.00	163.46	62.20	-	-	1747.28
Bubión			187.51	44.96	402.48	0.00	1490.94
Capileira			477.31	42.82	1020.56	0.00	5670.64
La Tahá	199.16	159.75	139.51	142.98	-	-	2560.31
Pórtugos	27.93	0.00	70.25	365.05	107.34	108.48	2060.73
Busquístar	25.38	0.00	178.88	152.53	261.70	212.50	1799.40
Trevélez	112.74	0.00	75.55	580.64	224.88	899.05	9080.51
TOTAL	707.90	579.49	2442.02	2240.77	3067.08	1770.55	34939.42

Sources : Libros de Apeos y Repartimientos (1572), Catastro del Marqués de la Ensenada (1752), Amillaramientos (1855/61), base de données SIG (surface communale totale). Mise en forme : García Martínez (1999), modifiée

Tableau 1: Surfaces cultivées en 1572, 1752 et 1855/61

Evaluation multicritères (EMC) : cartes d'aptitude d'occupation du sol

Hypothèse de départ et méthodologie

Parmi les variables disponibles et incluses dans la base de données géoréférencées, nous choisissons celles pouvant nous renseigner sur la localisation de chacune des grandes catégories d'occupation du sol à modéliser ; ces dernières ont dû être regroupées en deux grandes familles – regadío (cultures irriguées) et secano (cultures non irriguées) – eu égard à la fiabilité des sources historiques (cf. §2.2). L'EMC intègre ces variables, appelées critères. Parmi les critères on distingue entre contraintes ayant un caractère booléen (terrain apte ou inapte pour l'objectif choisi) et facteurs exprimant une variation, théoriquement continue, de l'aptitude à un usage. Les facteurs peuvent être pondérés et leur degré de compensation mutuelle est paramétrable ce qui détermine le degré de risque booléen flou dans la modélisation (Paegelow et Camacho Olmedo, 2005). Il en résulte pour chaque état de la variable discrète modélisée (catégories d'occupation du sol) une carte d'aptitude ou de potentialité. La mise en œuvre de l'EMC se fait sous Idrisi Kilimanjaro.

Le choix des variables s'appuie sur l'hypothèse qu'il existe une série de critères conditionnant la localisation des différents types d'occupation du sol. Cependant, sachant qu'il n'existe aucune cartographie pour les périodes à modéliser, seulement les critères invariables dans le temps ont été retenus. Ceux-ci sont aussi bien de nature physique (altitude, pente, etc.) qu'anthropique. Pour ces derniers, uniquement les critères que l'on peut raisonnablement qualifier de permanents ont été mobilisés. Dans la Alta Alpujarra, la création d'un important réseau de canaux d'irrigation durant la période d'occupation arabe et l'aménagement des flancs de montagne en terrasses de culture – des éléments encore visibles, au moins dans les grands traits^v, dans le paysage actuel – ont été retenus comme facteurs exprimant l'emprise anthropique sur le milieu : distance aux canaux d'irrigation, présence ou non de terrasses de culture. Un autre critère anthropique retenu pour l'analyse est la distance aux villages – considérée comme un facteur permanent même si les villages se sont agrandis au cours du temps, une extension cependant marginale à l'échelle du travail. Les auteurs sont conscients que les critères retenus ne constituent qu'une partie du cortège des variables aptes à expliquer la part rationnelle des transformations du paysage agricole. Ceci dit, d'autres

variables (pédologiques et sociales notamment) ne sont pas disponibles à l'échelle du travail. Nous signalons également que nous utilisons volontairement un nombre restreint de variables dans les multiples modélisations prospectives afin de nous assurer que le modèle reste simple et ne devienne le moule d'un contexte régional particulier et ceci avec des résultats relativement probants approchant les 80 % en comparaison pixel par pixel d'une taille d'environ 25 m (cf. publications citées en introduction).

A cela s'ajoute la cartographie de l'occupation du sol au milieu du 20^{ème} siècle, celle de 1957 qui correspond à l'occupation agricole maximale pour cette période. La localisation des catégories de regadío et de secano en 1957 et celle des cultures déjà abandonnées à cette date constituent la référence cartographique principale non seulement pour le choix des critères décrits mais également en tant que critère à part entière. En effet, il paraît logique de penser que les terrains cultivés ou abandonnés en 1957 présentent une plus forte probabilité d'avoir été cultivés dans le passé proche que les autres terrains (pâturages, ...).

Cette hypothèse doit cependant être relativisée. Si on consulte les statistiques de la superficie cultivée depuis le 16^{ème} siècle pour trois communes de la zone d'étude (Pórtugos, Busquístar et Trevélez), on constate une stabilité entre les années 1855/61, moment auquel l'on note un total de 1813.95 ha et les données de 1957 (Camacho et. al, 2003) avec des chiffres très proches (1803.08 ha cultivés dans les trois communes, auxquelles il convient d'ajouter 89.84 ha de cultures semi-abandonnées^{vi} ou en mosaïque microparcellaire dont la taille ne permet pas une discrimination satisfaisante entre l'état cultivé ou abandonné à l'échelle du travail). Cependant, comme nous le verrons dans les paragraphes suivants, il s'agit d'une stabilité seulement apparente : d'une part, l'évolution est contrastée d'une commune à l'autre, mais, surtout, on constate un recul net pour le secano et une augmentation importante du domaine de regadío ; une évolution affectant, en grande partie, des aires géographiques distinctes.

Tenant compte des restrictions énoncées, la cartographie de l'occupation du sol de 1957 a été mise en relation avec les variables de la base de données pour le choix des critères les plus significatifs. Ce choix s'appuie notamment sur la mise en relation (superficies absolues et relatives) de chacune des variables supposées explicatives avec chaque catégorie de la carte d'occupation du sol de 1957 (coefficient de corrélation de Pearson et indice de Cramer's V pour les variables nominales). Il en résulte une série de contraintes et de facteurs.

Les contraintes se matérialisent sous forme de cartes binaires masquant des zones désormais exclues de l'analyse : fonds des images hors zone d'étude, catégories d'occupation du sol incompatibles (pâturages d'altitudes, zones rocheuses, ravins, etc.) et intervalles de valeurs ou classes des variables significatives pour lesquelles l'analyse des données conclut à une absence probable de la catégorie d'occupation du sol en question.

Les facteurs forment des cartes d'aptitude sur une échelle standardisée allant de 0 (inapte) à 255 (aptitude maximale). La transformation des cartes des facteurs quantitatifs en degrés d'aptitude se fait, soit par regroupement linéaire, soit par une fonction d'appartenance de logique floue ; fonction s'appuyant sur une étude préalable du lien entre le facteur et la catégorie de la variable concernés. Le seul facteur qualitatif – l'occupation du sol en 1957 – fait l'objet d'un regroupement manuel (cf. tableau 3).

Les facteurs standardisés sont ensuite pondérés par la technique de pondération relative, par paires de facteurs, dans la matrice dite de Saaty (Saaty, 1977). Cette pondération relative s'appuie sur les indices d'association préalablement calculés (Cramer's V, coefficient de corrélation de Pearson). A partir de la matrice renseignée on calcule le vecteur propre en tant que poids de chaque facteur. L'option d'EMC choisie (ordered weighted averaging ; Eastman, 1993) propose une seconde phase de pondération. Ces poids, qui déterminent le niveau de compensation entre facteurs et, par conséquent, le niveau de risque s'exprimant sur un axe continu dont les extrémités sont le ET et le OU logiques flous, sont affectés de manière

spécifique à chaque pixel selon l'ordre décroissant des valeurs d'aptitude de chacun des facteurs. La stratégie retenue consiste à autoriser un niveau moyen de compensation entre facteurs et une prise de risque faible (cf. Paegelow et Camacho Olmedo, 2005). Le résultat de l'EMC est une carte de potentialité ou d'aptitude à un usage particulier.

Les deux paragraphes suivants détaillent l'élaboration des cartes d'aptitude pour les cultures irriguées et non irriguées.

Carte d'aptitude pour les cultures irriguées : regadío

Le paramétrage des critères mobilisés pour l'EMC des cultures irriguées est résumé dans les tableaux 2 et 3. Les contraintes portent sur les limites de la zone d'étude, l'exclusion des espaces urbanisés en 1957 ainsi que des espaces situés en haute altitude et / ou à l'étage alpin. La pondération des facteurs – déterminant la couleur de la carte modélisée – s'appuie sur des tests statistiques indiqués. Il en ressort l'impact primordial de l'altitude (40.4 %). Les autres facteurs influents sont la présence ou la proximité de terrasses de cultures (22.07 %) et la proximité aux sources d'irrigation (17.08 %). L'occupation du sol de 1957 pèse pour environ 13 % tandis que les distances aux cultures abandonnées en 1957 et aux zones urbanisées ont un impact très limité.

Variable	Contraintes (0/1)
Zone d'étude	Valeur 0 : hors zone d'étude
Occupation du sol en 1957	Valeur 0 : zone urbanisée
MNT	Valeur 0 : altitude > 2500 m
Etagement bioclimatique	Valeur 0 : étage oroméditerranéen et crioromédit

Tableau 2 : EMC. Contraintes pour regadío (cultures irriguées)

Facteur	Standardisation	Degré d'aptitude(0-255)	Poids
MNT	Regroupement linéaire en classes	Valeur 255 : altitude minimale; valeur 0 : altitude maximale	0.4040
Distance aux terrasses de culture	Fonction d'appartenance logique floue: j-shaped, symétrique. A=-0.1, b=0, c=100, d=500 m	Valeur 255 : présence de terrasses de cultures; valeur 0 : > 500 m de distance	0.2207
Distance au réseau d'irrigation / hydrographique	Fonction d'appartenance logique floue: j-shaped, symétrique. A=-0.1, b=0, c=100, d=500 m	Valeur 255 : distance 0 m; valeur 0: > 500 m	0.1708
Occupation du sol en 1957	Regroupement manuel en classes	Valeur 255 : regadío en 1957; valeur 128 : cultures abandonnées et micro-parcellaire de cultures et cultures abandonnées ; valeur 85 : secano, reboisements ; valeur 42 : formations arborées, matorral, pâturages ; valeur 0 : zones urbanisées	0.1319
Distance aux parcelles regadío 1957	Calcul de distance suivi d'un regroupement linéaire en classes	Valeur 255 : distance minimale des cultures abandonnées au regadío ; valeur 0 : distance maximale	0.0481
Distance aux zones urbanisées	Etalement de la dynamique suivi d'un tri décroissant	Valeur 255 : Distance minimale aux zones urbanisées ; valeur 0 : distance maximale	0.0245
TOTAL			1.0000

Tableau 3 : EMC. Facteurs pour regadío (cultures irriguées)

La figure 2 montre la carte d'aptitude de la catégorie regadío. Les zones en blanc correspondent aux contraintes (masques). Les zones les plus aptes forment des aires relativement continues, caractérisées par une altitude basse, sur terrasses et proches du réseau hydrographique et des zones urbanisées.

Carte d'aptitude pour les cultures non irriguées : secano

Les contraintes utilisées pour l'EMC du secano sont identiques à celles du regadío (tableau 4), mise à part une limite altitudinale plus élevée. Les facteurs les plus influents sont toujours l'altitude (37.16 %) suivie de l'occupation du sol en 1957 (20.29 %) et de l'éloignement aux terrasses de culture (20.29 %). Si la pente pèse encore à hauteur de 10 %, les autres facteurs ont un impact très limité (tableau 5).

Variable	Contraintes (0/1)
Zone d'étude	Valeur 0 : hors zone d'étude
Occupation du sol en 1957	Valeur 0 : zone urbanisée
MNT	Valeur 0 : altitude > 2500 m

Tableau 4 : EMC. Contraintes pour secano (cultures non irriguées)

Facteur	Standardisation	Degré d'aptitude(0-255)	Poids
MNT	Regroupement linéaire en classes	Valeur 255 : altitude maximale; valeur 0 : altitude minimale	0.3716
Occupation du sol en 1957	Regroupement manuel en classes	Valeur 255 : secano en 1957; valeur 213 : cultures abandonnées ; valeur 171 : reboisement ; valeur 128 : micro-parcellaire de cultures et cultures abandonnées ; valeur 85 : regadío ; valeur 42 : matorral ; valeur 28 : formations arborées, pâturages ; valeur 0 : zones urbanisées	0.2029
Distance aux terrasses de culture	Regroupement linéaire en classes	Valeur 255 : distance moyenne aux terrasses de cultures; valeur 0 : distances minimale et maximale	0.2029
Pentes	Regroupement linéaire en classes	Valeur 255 : pente maximale; valeur 0 : pente minimale	0.1005
Distance aux parcelles secano en 1957	Calcul de distance suivi d'un regroupement linéaire en classes	Valeur 255 : distance minimale des cultures abandonnées au secano ; valeur 0: distance maximale	0.0517
Distance aux zones urbanisées	Regroupement linéaire en classes	Valeur 255 : distance maximale des zones cultivées aux zones urbanisées; valeur 0 : distance minimales	0.0517
Distance au réseau d'irrigation / hydrographique	Fonction d'appartenance logique floue: j-shaped, symétrique. A=-0, b=100, c=500, d=2500 m	Valeur 255 : distance moyenne au réseau; valeur 0: distances minimales et maximales.	0.0188
TOTAL			1.0000

Tableau 5 : EMC. Facteurs pour secano (cultures non irriguées)

La figure 2 montre la carte d'aptitude pour la catégorie secano. Les terrains ayant une aptitude élevée se situent à mi-versant et relativement éloignés du réseau hydrographique et des zones urbaines.

Il convient de signaler que certains des critères mobilisés pour modéliser l'occupation du sol historique l'ont été aussi bien pour le regadío que pour le secano mais avec des paramétrages différents (altitude, distances au réseau hydrographique et aux villages, ...). La figure 2 montre ainsi une juxtaposition des aires les plus aptes au regadío (notamment sur terrasses de cultures basses) et au secano qui se situent principalement plus en altitude que les premières.

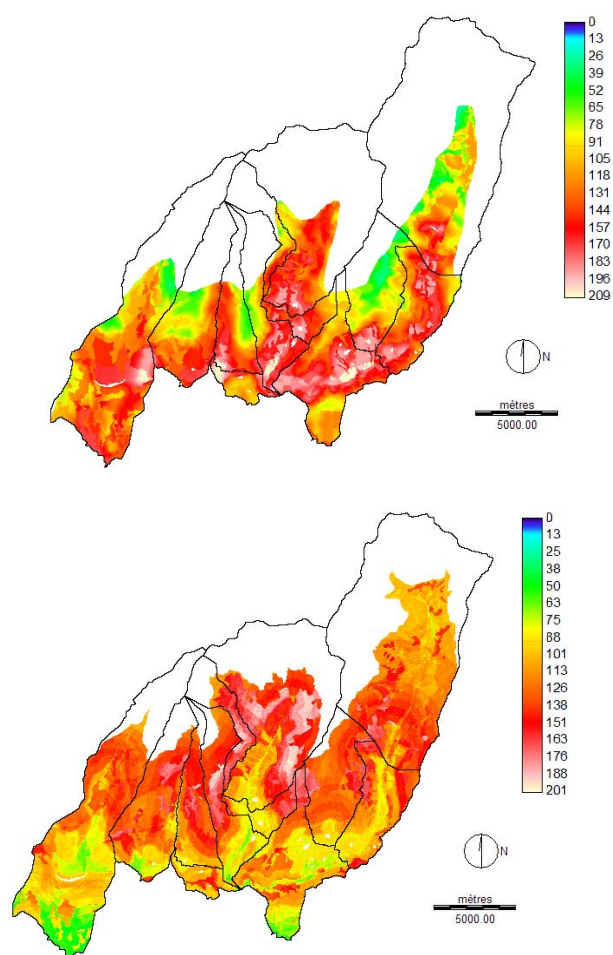


Figure 2 : EMC – cartes d'aptitude pour regadío (cultures irriguées ; à gauche) et secano (non irriguées ; à droite) (en blanc: zones inaptées, masquées par les contraintes appliquées)

Evaluation multiobjectifs (EMO): reconstruction du paysage historique

Arrivé à ce stade, il s'agit de résoudre les conflits entre les deux objectifs. En l'occurrence, les deux états (regadío et secano) de la variable étudiée sont des objectifs concurrents. L'EMO s'appuie sur les deux cartes d'aptitude élaborées avec l'EMC. Son rôle est d'assigner à chaque pixel l'objectif optimal en se basant sur les aptitudes calculés séparément et ceci pour chaque date modélisée en y ajoutant un objectif en superficie issu des sources statistiques historiques. Puisque les sources historiques permettent de connaître les superficies d'occupation du sol pour chaque commune (cf. tableau 1), le traitement s'est fait séparément pour chacune d'elles et ceci pour chaque date : 1572, 1752 et 1855/61 avec un paramétrage identique, excepté le critère surfacique. Les deux objectifs ont reçu le même poids. La

tolérance surfacique a été fixé à 0 pixels (correspondance parfaite avec l'objectif surfacique) ce qui entraîne une application répétitive de l'algorithme afin de s'en approcher au mieux.

Les figures 3, 4 et 5 montrent les résultats de la modélisation rétrospective de l'occupation du sol pour les années 1572, 1752 et 1855/61 en regroupant les résultats partiels obtenus pour chaque commune. Les surfaces du regadío et du secano, indiquées dans les légendes respectives, correspondent au total des communes et sont identiques à celles du tableau 1.

La modélisation rétrospective est une approximation probabiliste de la cartographie des principales catégories d'occupation du sol du passé. Si leur extension surfacique correspond fidèlement aux données extraites des sources historiques, leur localisation spatiale ne peut être validée. Cependant la mise en relation cartographique et statistique des données obtenues par modélisation avec les cartes de l'occupation du sol de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, obtenues essentiellement par photo-interprétation, pourra – outre les contraintes du milieu – apporter des informations utiles à l'interprétation et à l'appréciation des résultats. Néanmoins cette comparaison souffre d'un handicap de taille : l'occupation du sol en 1957 fait également partie du lot de critères utilisés pour simuler la localisation du regadío et du secano aux dates antérieures indiquées. Cet apparent caractère tautologique est cependant très partiel. Ainsi les poids cumulés des facteurs s'appuyant sur l'état de 1957 (cf. tableaux 3 et 5) s'élèvent respectivement à 18 % (regadío) et 25.46 % (secano). Conscients des limites de l'exercice et faute de moyens de validation, nous discuterons les résultats obtenus pour ensuite établir un lien avec la situation historiquement la plus proche : celle de 1957.

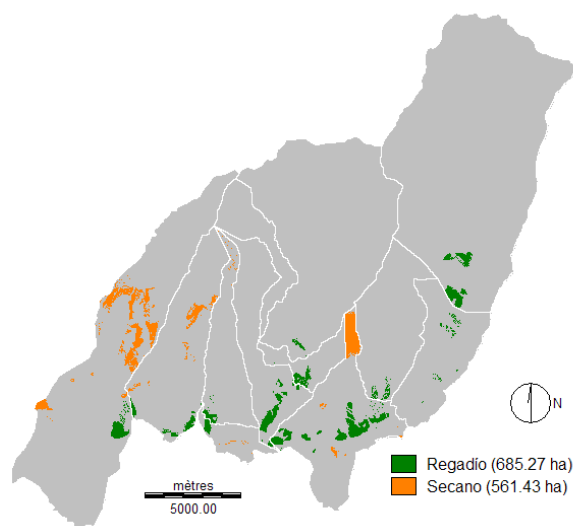


Figure 3 : Modélisation pour regadío (cultures irriguées et secano (non irriguées) pour 1572

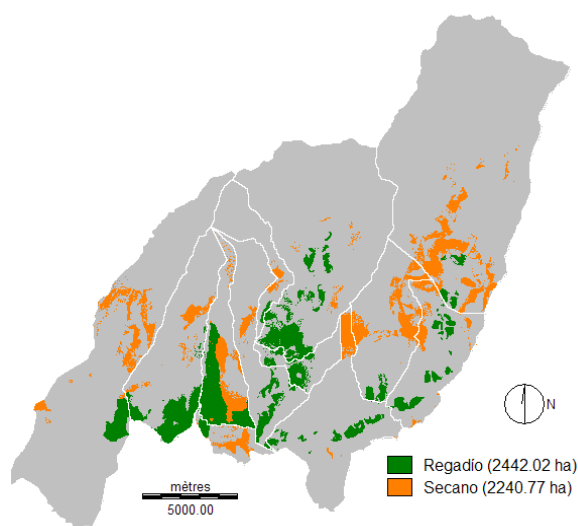


Figure 4 : Modélisation pour regadío (cultures irriguées et secano (non irriguées) pour 1752

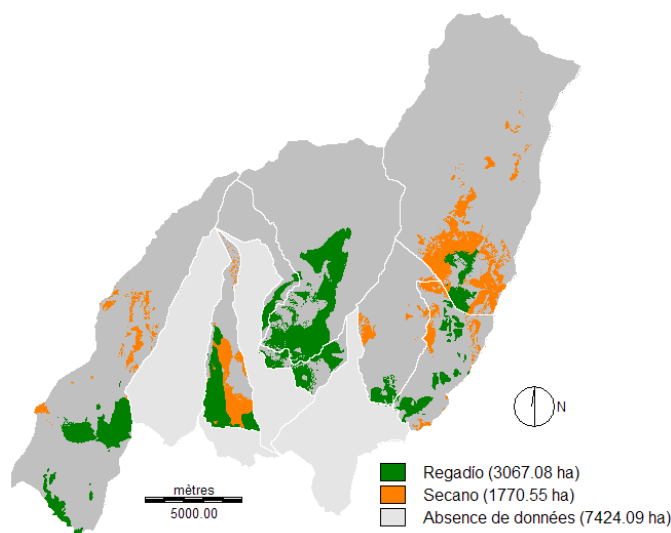


Figure 5 : Modélisation pour regadío (cultures irriguées) et secano (non irriguées) pour 1855/61

Interprétation

Analyse comparative des résultats de la modélisation rétrospective et des cartographies de l'occupation du sol de la seconde moitié du 20^{ème} siècle

A première vue, les résultats de la modélisation rétrospective (figures 3 à 5) montrent une certaine similitude du point de vue des structures spatiales entre les trois dates ainsi qu'une augmentation générale de la surface cultivée depuis le 16^{ème} jusqu'au 19^{ème} siècle. Cette augmentation est beaucoup plus évidente entre 1572 et 1752 (à l'exception de la commune de La Tahá dont la surface agricole diminue) que pour la période 1752 à 1855/61 où la situation est plus nuancée. Sur un total de sept communes, documentées en 1855/61, cinq connaissent

une augmentation de leur surface cultivée, Soportújar affiche une situation stable tandis que Pórtugos enregistre un recul.

Pour la plupart des communes, l'extension de la superficie agricole concerne aussi bien les cultures irriguées que non irriguées. Cette augmentation, d'une date à l'autre, se fait, selon les résultats de la modélisation, par effet de contiguïté ou à proximité des noyaux agricoles initiaux – un effet d'extension dans la continuité spatiale notamment observable entre 1752 et 1855/61. Néanmoins, certaines communes échappent à la règle (tout en affichant une augmentation globale de la superficie agricole). Ainsi la surface du secano baisse entre 1752 et 1855/61 pour Lanjarón, Bubión, Capileira et Pórtugos et celle du regadío diminue entre les mêmes dates dans la commune de Soportújar. Ce processus de rétraction spatiale suit, en termes de localisation, la même règle que celui de l'extension générale : il s'agit, selon notre modélisation, d'un effet de voisinage, en l'occurrence d'une dynamique spatialement régressive.

Comparaison entre occupation du sol historique et récente

Les figures 6 à 10 montrent l'occupation du sol observée en 1957, 1974, 1987 et 2001. Leur nomenclature a été réduite afin de la faire coïncider à celle des cartes de la modélisation rétrospective. Cependant, dans les cartes de la seconde moitié du 20^{ème} siècle (exceptée celle de 1974 établie selon des cartes thématiques et non par photo-interprétation) apparaît – outre le regadío et le secano – une catégorie d'occupation du sol très importante pour comprendre la dynamique paysagère actuelle de la Alta Alpujarra : le « semi-abandon ». Ce terme regroupe les parcelles qui font l'objet d'une activité agricole et d'un entretien non permanents. Certaines années elles portent des cultures, d'autres non. Ce semi-abandon est facilité par la lenteur de la reconquête végétale eu égard aux conditions arides du secteur. S'y ajoute un enchevêtrement de micro-parcelles réellement utilisées ou abandonnées dont la discrimination, à l'échelle du travail, n'est pas possible. Le tableau 6 résume les surfaces par catégorie et par date.

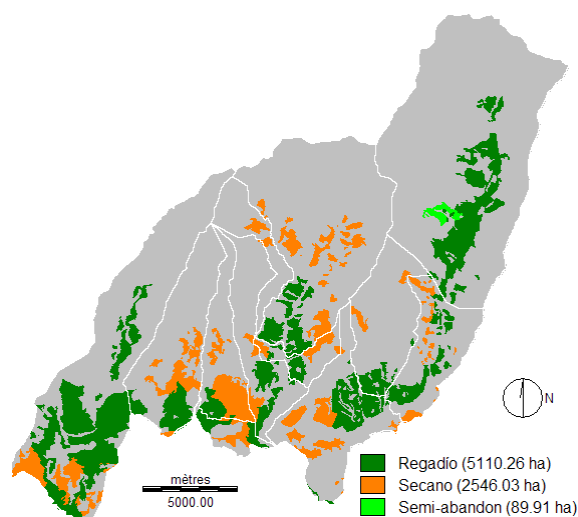


Figure 6 : Occupation du sol en 1957

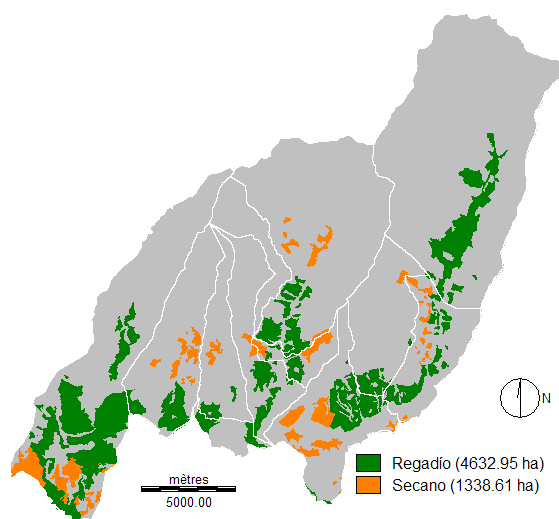


Figure 7 : Occupation du sol en 1974

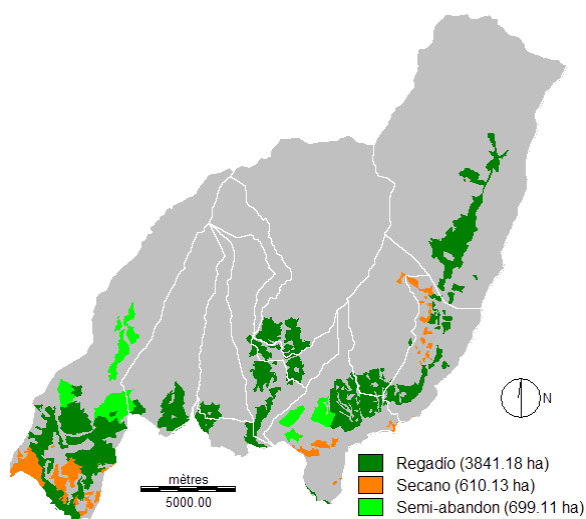


Figure 8 : Occupation du sol en 1987

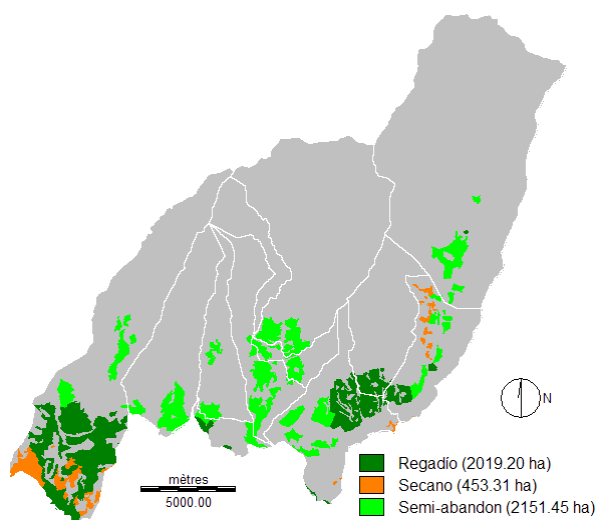


Figure 9 : Occupation du sol en 2001

	1957			1974			1987			2001		
	Regadío	Secano	Semi abandon	Regadío	Secano	Semi abandon	Regadío	Secano	Semi abandon	Regadío	Secano	Semi abandon
Lanjarón	1717.03	97.38		1661.10	396.26	-	1183.22	398.94	454.74	1281.43	342.38	236.63
Cáñar	329.66	13.01		308.15	145.28	-	277.35	-	30.74	-	-	284.83
Soportújar	135.18	95.69		88.16	48.82	-	74.14	-	-	-	-	125.33
Carataunas	142.79	02.32		126.51	-	-	122.77	-	-	46.85	-	84.22
Capileira	419.40	60.27		419.84	142.23	-	270.57	-	-	-	-	270.63
Bubión	116.81	89.45		116.81	105.41	-	149.71	-	-	-	-	149.71
Pampaneira	241.10	8.62		241.10	32.64	-	267.64	-	-	-	-	307.82
La Tahá	426.44	54.79		426.69	332.93	-	414.79	92.83	213.44	414.79	19.87	286.39
Pórtugos	181.11	6.35		164.66	20.50	-	163.04	10.34	-	157.74	-	-
Busquístar	320.28	64.04		309.94	111.58	-	276.67	106.28	-	110.39	89.40	155.00
Trevélez	1027.43		9.91	762.30	-	-	634.09	-	-	3.55	-	247.77
TOTAL	5110.26	546.03	9.91	4632.95	1338.51	-	3841.18	610.13	699.11	2019.20	453.31	2151.45

Sources: 1957 et 2001 – photographies aériennes ; 1974 – carte des Cultivos y Aprovechamientos - Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación ; 1987 – Jiménez Olivencia (1992)

Tableau 6 : Occupation du sol en 1957, 1974, 1987 et 2001 (ha)

Une comparaison visuelle des cartes réelles de la seconde moitié du 20^{ème} siècle avec les cartes historiques obtenues par modélisation souligne que les zones les plus aptes au regadío durant la période allant du 16^{ème} au 19^{ème} siècle correspondent, *grosso modo*, à celles effectivement dédiées à cet usage en 1957. Le cas du secano est différent : il paraît que d'autres critères que ceux disponibles et utilisés dans l'EMC influaient sur la localisation. Ceci expliquerait la localisation de certaines zones, ayant un degré d'aptitude très élevé pour le secano, situées à mi-versant, comme c'est le cas dans les communes de Lanjarón ou encore de La Tahá en 1572 et en 1752 mais aussi la trace laissée par le facteur distance dans la modélisation du secano à Trevélez aussi bien pour 1752 que pour 1855/61.

Une analyse de la série chronologique complète, du 16^{ème} siècle à nos jours, fait ressortir que les dates les plus adéquates pour l'analyse de l'occupation du sol sont, d'une part, la seconde moitié du 19^{ème} siècle, représentant le « plafond des possibilités vitales » du système d'exploitation traditionnel (Bosque, 1969) et, d'autre part, la date de 1957 coïncidant avec l'usage agricole maximal dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Depuis on assiste à un processus d'abandon des terres qui dure jusqu'à nos jours.

Une analyse à l'échelle communale montre que, parmi les communes pour lesquelles nous avons des données pour 1855/61, l'occupation du sol est maximale au 19^{ème} siècle à Capileira, Bubión et Soportújar. A Lanjarón et Trevélez la superficie agricole est plus importante en 1957 tandis que l'on observe une quasi-stabilité à Pórtugos et Busquístar. Pendant cette période se produisent également des changements importants concernant les types de cultures. C'est le cas de Capileira dont l'usage agricole en 1857 était exclusivement de type regadío tandis qu'en 1957 la surface agricole était partagée entre regadío et secano. Le processus inverse a lieu à Trevélez^{vii}.

Superposition de la modélisation de l'occupation du sol de 1855/61 avec l'occupation du sol cartographiée pour 1957

L'analyse de la diversité des situations locales, esquissée ci-dessus, est importante pour l'interprétation des résultats de la modélisation. La figure 10 est un croisement entre la date

modélisée la plus récente (1855/61) et la date de la cartographie réelle la plus proche (1957) – des dates qui correspondent chacune à un usage agricole maximal pour des périodes et des systèmes d'exploitation différents. Cependant, nous l'avons dit, les conclusions de cette comparaison sont hypothéquées par le poids (18 % pour le regadío, 25.46 % pour le secano) de l'occupation du sol de 1957 sur la carte modélisée de 1855/61. Néanmoins, cette comparaison permet de mettre en évidence les limites à la fois de la méthode et des données y sont intégrées en identifiant les résidus : zones et dynamiques échappant au modèle.

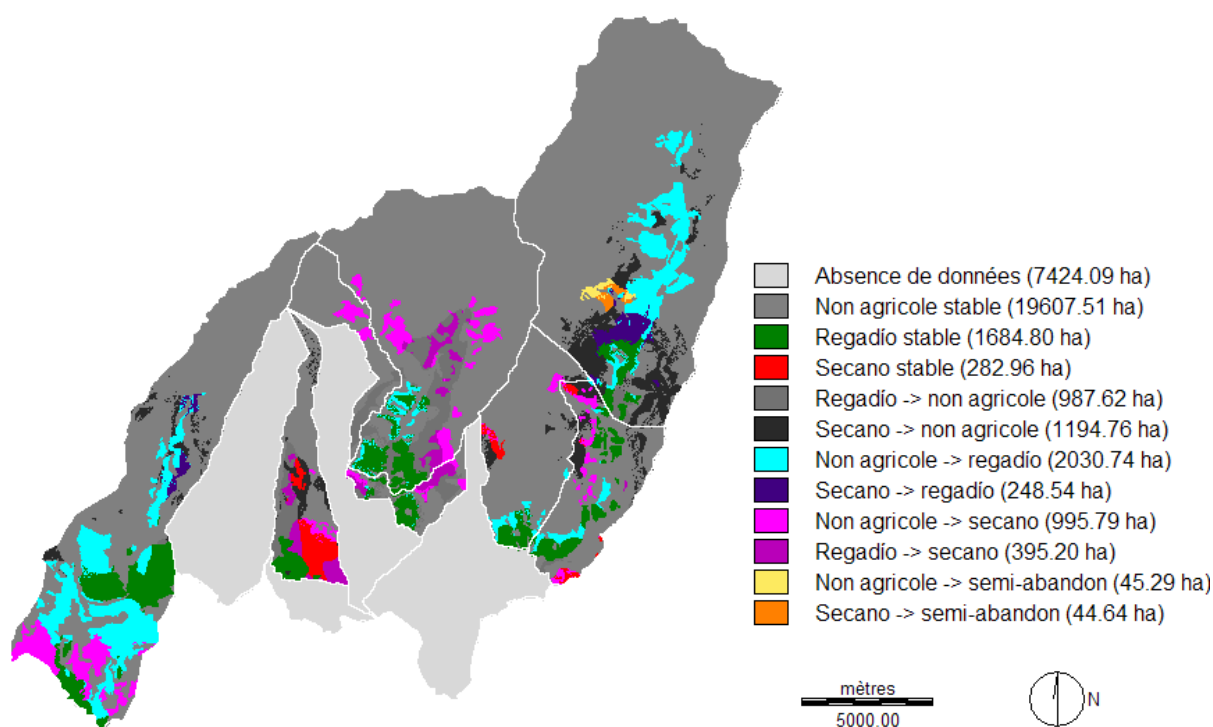


Figure 10 : Croisement entre l'occupation du sol modélisée en 1855/61 et réelle en 1957^{viii}

Le tableau 7 est une matrice croisée des deux dates, correspondant à la figure 10 mais avec une nomenclature plus complète quand à l'occupation du sol en 1957. Ainsi, la catégorie *non agricole* de 1855/61 est subdivisée en trois états : forêt, matorral et pâturages ; reboisement de conifères ; cultures abandonnées. La catégorie *cultures abandonnées* est très expressive des transformations agricoles puisqu'elle est l'empreinte spatiale de l'occupation du sol agricole passée.

Tout en étant conscient qu'un siècle sépare les deux dates et des transformations ayant eu lieu entre temps ainsi que des limites statistiques des sources utilisées, ce croisement fournit, néanmoins, de par la superposition ou la juxtaposition spatiales, des indications sur la qualité de la modélisation. Etant donnée l'absence de données pour quatre communes en 1855/61, la comparaison se base sur les sept communes restantes.

			1855/61			
Occupation du sol			Non agricole	Regadío	Secano	Tota l 1957
1957	Non agricole	Forêt, matorral, pâturages	17519.42	160.49	458.64	18138.55
		Reboisement de conifères	667.18	288.54	235.81	1191.53
		Cultures abandonnées	1435.45	539.20	501.20	2475.85
	Semi-abandon		45.30	0.00	44.68	89.98
	Regadío		2032.24	1686.05	248.73	3967.02
	Secano		996.53	395.49	283.17	1675.19
Total 1855/61			22696.12	3069.77	1772.23	27538.12

Tableau 7 : Croisement entre l'occupation du sol modélisé en 1855/61 (lignes) et l'occupation du sol réelle en 1957 (colonnes), superficies en ha

Les données du tableau 7 montrent que seulement un peu plus de la moitié du regadío en 1855/61 (3067 ha) l'est encore en 1957 (1685 ha). Les 1382 ha restants se répartissent en cultures abandonnées (539 ha), secano (395 ha), reboisement de conifères (289 ha) et terres embroussaillées ou recolonisées par la forêt (160 ha). Le tableau indique également clairement l'augmentation globale du regadío (900 ha). En l'occurrence, il s'agit essentiellement de la mise en culture de terres non agricoles auparavant (2032 ha) tandis que la part du secano transformé en regadío (249 ha) est modeste.

Contrairement au regadío (en progression nette), la surface globale du secano reste quasiment stable sur 100 ans. Mais derrière ce solde stable se cachent des mutations spatiales profondes. Sur un total de 1772 ha de secano en 1855/61, seulement 16 % (283 ha) le sont encore en 1957. Les pertes se partagent entre abandon (501 ha), terres abandonnées et déjà recolonisées par la végétation (459 ha) ou reboisées (236 ha), parcelles en situation de semi-abandon (45 ha) et transformation en regadío (249 ha). Les gains du secano proviennent essentiellement de la mise en culture de terres recensées comme non agricoles en 1855/61 (997 ha) et, dans une moindre mesure, de l'abandon de l'irrigation (395 ha).

Si le solde des transformations entre secano et terres non agricoles (les trois catégories réunies) est presque équilibré (1196 ha de secano sont devenues non agricole tandis que 997 ha de terres à usage non agricole sont recensées comme secano en 1957), celui des échanges entre regadío et terres non agricoles est largement positif au profit de la première catégorie (plus du double).

Cependant ces dynamiques sont très localisées. La figure 10 montre qu'une part importante de nouvelles terres agricoles est localisée dans la commune de Lanjarón. A Trevélez, l'évolution peut être schématisée par l'abandon du secano en situation de mi-versant ou leur transformation en regadío et la conquête des parties basses des versants par le regadío. Ce processus est inversé à Capileira avec l'abandon du regadío à mi-versant tandis qu'apparaissent de nouvelles cultures irriguées le long des canaux mais surtout des cultures non irriguées – une catégorie inexistante à Capileira au milieu du 19^{ème} siècle.

Toutes ces constatations laissent penser que les différences entre la modélisation de 1855/61 et la cartographie de 1957 (en tenant compte des restrictions méthodologiques énoncées concernant la localisation intra-communale) sont liées à des stratégies agricoles très dissemblables d'une commune à l'autre, échappant de ce fait à la modélisation reposant sur un cortège uniforme de critères : augmentation de la surface agricole à Lanjarón, disparition

du secano à Trevélez et disparition partielle du regadío à Capileira. Cependant on peut douter des résultats tant l'ampleur de la transformation du secano en regadío (249 ha dans l'ensemble des 7 communes) et *vice versa*. (395 ha) paraît difficile à expliquer pour l'époque et fait davantage penser à des différences de définition et d'identification de catégories d'occupation du sol selon les sources utilisées (García Martínez, 1999, pp. 350-362). Dans le contexte de la Alta Alpujarra, ce doute est, parfois, lié à un seuil mal défini entre, d'une part, regadío et secano et, d'autre part, irrigation permanente ou occasionnelle.

Dans le cas des communes de Busquístar, Trevélez et Pórtugos (Camacho Olmedo et al, 2003, pp. 11-12), l'augmentation importante du regadío entre 1855/61 et 1957 – qui va de pair avec la diminution du secano – facilite la correspondance entre modélisation et occupation du sol réelle 100 ans plus tard : les terrains les plus aptes au regadío sont effectivement voués à cet usage sur la carte de 1957 même si leur extension est nettement plus faible qu'en 1957. Ainsi 88 % des terres modélisées pour 1855/61 comme regadío l'étaient effectivement en 1957 (100 % à Pórtugos).

Conclusion

Les limites de la modélisation rétrospective présentée sont aussi bien liées aux sources statistiques et cartographiques utilisées qu'à la méthodologie mise en œuvre.

Bien que nous ayons commenté de manière détaillée chacune des sources historiques (cf. § 2.2), nous devons ici rappeler les limites inhérentes à l'utilisation de ces documents qui – au-delà des données manquantes – se manifestent sous forme de définitions variables des catégories cadastrales ou encore l'inadéquation entre, d'une part, la superficie cadastrée selon ces sources et, d'autre part, la superficie géographique réelle et celle obtenues par les cartes numérisées.

Quant à la base de données constituée pour l'évaluation multicritères, les limites résultent du fait que nous avons utilisé une information actuelle pour modéliser un paysage historique. A cela s'ajoute une contrainte méthodologique : la limitation aux données cartographiées. Ainsi le manque de critères relatifs à la localisation spécifique de chacune des catégories d'occupation du sol se fait sentir. A cela s'ajoute des modifications temporelles de certains critères – modifications non prises en compte faute d'une information spatialisée précise. L'obtention d'une carte d'aptitude unique par catégorie d'occupation du sol pour toutes les dates en est la conséquence la plus visible.

Sur un autre plan, le fait d'avoir obtenu une carte d'aptitude pour l'ensemble des communes – et non une pour chacune – cause certaines des inadéquations soulignées. Si on analyse les cartes d'aptitude pour le regadío et le secano on remarque une certaine convergence des critères de localisation, visible dans les cartes par une certaine contiguïté spatiale entre les zones d'aptitude élevée pour le regadío (en bas des versants sur terrasses) et le secano (à des altitudes plus élevées). Cependant, la diversité des cultures et des formes d'exploitation (de « vega » ou de « sierra », cf. § 2.2. et annexes, ou encore avec une irrigation occasionnelle) fait que les conditions ne sont pas toujours identiques, d'une commune à l'autre. Ceci est plus palpable pour le secano, localisé aussi bien à mi-versant qu'à des altitudes plus basses comme c'est le cas du regadío mais plus éloigné du réseau hydrographique. La modélisation a cependant essayé d'enrayer ces effets par des facteurs liés directement (zones identifiées pour chaque catégorie) ou indirectement (distances des cultures abandonnées spécifiques à chaque catégorie modélisée, distances aux zones habitées) à la cartographie de 1957.

Le fait d'avoir utilisé la cartographie de 1957 comme référence spatiale provoque un certain conditionnement des résultats, autrement dit : la modélisation se rapproche de l'occupation réelle en 1957 ce qui restreint les possibilités de validation de la méthodologie

par comparaison entre l'occupation du sol modélisée et réelle 100 ans plus tard. Mais la situation est plus différenciée à l'échelle communale. Dans les communes où se produit, selon les sources utilisées, une transformation importante de l'occupation du sol (Lanjarón, Capileira, Trevélez), les zones optimales sont davantage corrélées avec les facteurs autres que l'occupation du sol en 1957. Les cas les plus difficiles à interpréter sont, comme indiqués, les échanges entre regadío et secano. Ces différences, significatives à l'échelle communale, limitent clairement la portée des résultats obtenus.

La dernière limitation méthodologique a trait à l'évaluation multiobjectifs visant à résoudre les conflits d'objectifs en se basant sur les degrés d'aptitude de chacun d'eux alors que la localisation réelle ne peut être expliquée que par les critères étant à la base du calcul. Ces questionnements ne mettent cependant pas en cause le fait que les techniques d'EMC et d'EMO apparaissent, à la lumière des résultats obtenus et compte tenu des données disponibles et de leur qualité, comme une méthode probabiliste d'approximation cartographique du paysage historique intéressante et capable de traiter un nombre élevé de critères conditionnant ledit paysage. La démarche est transposable à d'autres espaces et offre une solution au cas le plus répandu : celui de disposer de statistiques historiques mais pas d'une cartographie du phénomène étudié. Il est important de faire la modélisation séparément pour chacune des unités administratives recensées afin de faire correspondre la surface modélisée des états du phénomène étudié aux sources statistiques. Une amélioration du modèle consisterait à calculer une carte d'aptitude EMC propre à chacune des unités administratives et non, comme nous l'avons entrepris, pour l'ensemble du périmètre étudié. Cet affinement du modèle permettrait notamment de rendre compte des connaissances historiques inégales d'un endroit à l'autre mais aussi de leur degré de fiabilité. Enfin, la nécessité d'une calibration du modèle par recours à la première cartographie disponible dépend de l'ampleur des connaissances spatialisées disponibles, variables d'un site à l'autre.

Bibliographie

- Banos, A., 2001, "A propos de l'analyse spatiale exploratoire des données", *Cybergéo : Revue européenne de géographie*, No 197, 18/10/2001. (<http://www.cybergeog.presse.fr>)
- Barredo J.I., 1996, *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación multicriterio en la Ordenación del Territorio*, Madrid, Edit Ra-ma.
- Barredo J.L., Kasanko M., McCormick N., Lavallo C., 2003, "Modelling dynamic spatial processes: simulation or urban future scenarios through cellular automata", *Landscape and Urban Planning*, Vol 64, 145-160.
- Bosque J., 1969, *Tradición y modernidad en las Alpujarras granadinas. Estudios de Geografía Agraria de Andalucía*, Madrid, Ed. Aljibe.
- Camacho Olmedo M.T., García Martínez P., Montoya Puertas M.G., 2003, "Reconstrucción del paisaje histórico utilizando técnicas de evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo", in SIBSIG, AESIG, *De lo local a lo global. Nuevas tecnologías de la información geográfica para el desarrollo*, GMCSIGT, Universidad de Extremadura, Cáceres, 37-55.
- Camacho Olmedo M.T., Mulero Perez A., Naveros Santos D., Salinas Sanchez F., 2004, "Ensayo de modelización retrospectiva del paisaje utilizando las técnicas de evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo", in GMCSIGT, *AGE Territorio y medio ambiente: Métodos cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica*, Universidad de Murcia, 303-316.
- Coquillard P., Hill D.R.C., 1997: *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*, Paris, Masson.
- Delaigue M.C., 1995, "La red de acequias de la Alta Alpujarra", in *Sierra Nevada '95 El Legado Andalusi El agua en la agricultura de Al-Andalus*, Barcelona, Lunwerg Editores.
- Eastman J.R., 1993, *IDRISI, A grid based geographic analysis system.*, Massachusetts, Clark University.

- Ferraty F., Paegelow M., Sarda, P., 2005, "Polychotomous regression: application to land cover prediction", in Haerdle W., Mori Y., Vieu P. (coord.) *Statistical case studies*, Springer Verlag, e-book XploRe, 13 p. (<http://www.xplo-re-stat.de/ebooks/ebooks.html>).
- Follador M., Paegelow M., Renno F., Villa N., 2006, "Integrating remote sensing, GIS and prediction models to monitor deforestation and erosion in Peten Reserve, Guatemala", in IAMG'06, *Society for Mathematical Geology*; XIth International Congress, Université de Liège (3-8 septembre 2006), à paraître.
- García Martínez P., 1999, *La transformación del paisaje y la economía rural en la Alta Alpujarra Occidental*, Granada, Editorial de la Universidad de Granada.
- Gómez-Delgado M., Tarantola S., 2006, "GLOBAL sensitivity analysis, GIS and multicriteria evaluation for a sustainable planning of hazardous waste disposal site in Spain", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 20, No 4, 449-466.
- Jiménez Olivencia Y., 1992, *Los Paisajes de Sierra Nevada*, Granada, Universidad de Granada.
- Jiang H., Eastman J.R., 2000, "Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 14, No 2, 173-184.
- Li X., Yeh A., 2002, "Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 16, No 4, 323-343.
- López E., Bocco G., Mendoza M., Duhau E., 2001, "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A case in Morelia city, Mexico", *Landscape and Urban Planning*, Vol 55, 271-285.
- Manson, S., 2006, "Land use in the southern Yucatán peninsular region of Mexico: Scenarios of population and institutional change", *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 30, issue 3, 230-253.
- Malczewski J., 2006, "Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land use suitability analysis", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, à paraître.
- Mas J.F., Puig H., Palacio J.L., Sosa A.A., 2004, "Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks", *Environmental Modelling and Software*, Vol. 19, No 5, 461-471.
- Murphy S.A., van der Vaart A.W., 2001, "Semiparametric Mixtures in case-control studies", *Journal of Multivariate Analysis*, Vol. 79, issue 1, 1-32.
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., 2003, "Le processus d'abandon des cultures et la dynamique de reconquête végétale en milieu montagnard méditerranéen : L'exemple des Garrotxes (P.O., France) et de la Alta Alpujarra Granadina (Sierra Nevada, Espagne)", *Sud-Ouest Européen*, No 16, 113-130.
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Menor Toribio J., 2003, "Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje", *Geofocus*, No 3, 22-44.
- Paegelow M., Villa N., Cornez L., Ferraty F., Ferré F., Sarda P., 2004, "Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne (66)", *Cybergéo : Revue européenne de Géographie*, No 295, 6/12/ 2004, 19 p. (<http://www.cybergeog.presse.fr>)
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., 2005, "Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain)", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.19, No 6, 697-722.
- Saaty T.L., 1977, "A scaling method for priorities in hierarchical structures", *Journal of mathematical Psychology*, No 15, 234-281.
- Soares-Filho B. S., Nepstad D.C., Curran L.M., Coutinho Cerqueira G., Garcia R.A., Azevedo Ramos C., Voll E., McDonald A., Levebvre P., Schlesinger P., 2005, "Modelling conservation in the Amazon basin", *Nature*, No 04389, 10.1038, 4p.
- Soares-Filho B. S., Coutinho Cerqueira G., Lopes Pennachin C., 2006, "DYNAMICA – a stochastic cellular automata model to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonisation frontier", *Ecological Modelling*, No 154, 217-235.
- Stefanakis, E., 2003, "Modelling the history of semi-structured geographical entities", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 17, No 6, 517-546.
- Villaneix N., Paegelow M., Camacho Olmedo M. T., Cornez L., Ferraty F., Ferré L., SZarda P., 2006, "Various approaches for predicting land cover in mountain areas". *Communication in Statistics*, Vol. 36, à paraître.

Annexes

Annexe 1 : Répartition des terres en 1572

Le tableau ci-dessous indique pour chacune des communes étudiées, le nombre *suertes* (lot de terres), la surface de la *suerte tipo* (avec distinction entre terres irriguées et non irriguées) et la surface totale attribuée pour 1572, subdivisée elle aussi en *regadío* et *secano*.

Concernant ce tableau, certaines remarques doivent être apportées. Les différences, importantes pour certaines communes, de la taille des *suerte tipo* remises s'expliquent, notamment, par la présence ou non de certaines catégories de terres. Ainsi la présence de terres non irriguées, auxquelles les Maures attribuaient peu d'intérêt, explique la plus grande taille des *suerte tipo* dans les communes de Lanjarón (4.6980 ha), Mecina-Fondales (3.0488 ha) ou Cañar (2.1994 ha). Pour Trevélez, c'est la présence de la catégorie « *regadío de sierra o eventual* » (terres occasionnellement irriguées et situées en altitude) (2.5364 ha), significative de l'emplacement particulier de cette commune en haute altitude, qui explique l'extension surfacique importante de la *suerte tipo*. Dans les autres communes les terres non irriguées ne faisaient pas partie (ou, du moins, avaient une extension négligeable) des *suertes* ce qui ne signifie pas qu'il n'y en avaient pas. Mais, au moins aux débuts, elles ne faisaient pas l'objet de répartition entre les nouveaux propriétaires en raison du peu d'intérêt que les Maures y portaient.

Commune	Nombre de suertes	Suerte tipo (ha)		Surface répartie (ha)	
Lanjarón	62	6.1775	Regadío 1.4795 Secano 4.6980	Regadío 91.729 Secano 291.270	382.999
Cañar	33	3.8903	Regadío 1.6909 Secano 2.1994	Regadío 55.799 Secano 72.580	128.379
Soportújar	31	1.1626	Regadío 0.9512 Secano 0.2114	Regadío 29.487 Secano 6.553	36.040
Carataunas	16	1.5853	Regadío 1.2628 Secano 0.3171	Regadío 20.204 Secano 5.073	25.364
Pampaneira	16	1.7966	Regadío 1.7966	Regadío 28.745	28.745
Bubión	34.5			Regadío 61.982	61.982
Capileira	39			Regadío 70.067	70.067
La Tahá	Alguastar 5.5	-*	-	-	125.000
	Mecina Fondales 20	4.2440	Regadío 0.7926 Secano 3.4514	Regadío 15.852 Secano 69.028	
	Ferreirola 16	0.7926	Regadío 0.7926	Regadío 12.681	
	Atalbeitar 10	2.7439	Regadío 2.7439	Regadío 27.439	
Pórtugos	75.5	0.3699	Regadío 0.3699	Regadío 27.927	27.927
Busquistar	30	0.8455	Regadío 0.8455	Regadío 25.365	25.365
Trevélez	27	4.1745	Regadío 4.1745	Regadío 112.712	112.712
TOTAL	415.5				1024.58

Source : Libros de Apeo y Repartimiento, 1572. Mise en forme: García Martínez (1999), modifiée

Répartition des *suertes*, *suerte tipo* et surface totale répartie en 1572. (* absence de données)

Annexe 2 : Occupation du sol en 1572

Pour calculer les surfaces totales^{ix} réparties en 1572, nous avons multiplié le nombre de *suertes* remises par la taille de la *suerte tipo*, spécifique à chaque commune ; la même opération aboutit également à la surface communale totale des cultures irriguées (*regadío*) et non irriguées (*secano*). Ces données, qui figurent également dans le tableau ci-dessous, doivent cependant être interprétées avec attention. Ainsi figurent dans les registres d'époque certaines annotations susceptibles de relativiser ces chiffres. En premier lieu, signalons que les terres

appartenant à l'église ne sont pas toujours connues avec précision et ne sont pas comptabilisées dans le total communal. Il faut également signaler la présence de certaines propriétés non réparties, situées dans la vallée du Poqueira, Ferreñola, Busquístar y Trevélez (respectivement 4, 4, 3 et 1 *suertes*). La non attribution de ces terres peut s'expliquer par la nécessité d'indemniser soit des Chrétiens déjà présents, soit l'église ou encore de compenser un partage inégal entre les nouveaux habitants. De fait, ces terres ont été cultivées par des agriculteurs ayant obtenu la propriété par la suite et ont été incluses dans la surface cultivée totale des communes respectives. Enfin, durant la répartition définitive des terres, des habitants de Soportújar, Cañar y Pórtugos ont vu s'agrandir leur propriétés de quelques terrains dispersés (zones marécageuses ou cultures arborées) dont la taille reste cependant peu significative.

Commune	Regadío	Secano	TOTAL Surface cultivée	Terres non cultivées et / ou non agricoles ^x	TOTAL
Lanjarón	91.729	291.270	382.999	-	-
Cañar	55.799	72.580	128.379	-	-
Soportújar	29.487	6.553	36.040	-	-
Carataunas	20.204	5.073	25.364	-	-
Pampaneira	28.745	0.000	28.745	-	-
Bubión	61.982	0.000	61.982	-	-
Capileira	70.067	0.000	70.067	-	-
La Tahá	55.972	69.028	125.000	-	-
Pórtugos	27.927	0.000	27.927	-	-
Busquístar	25.365	0.000	25.365	-	-
Trevélez	112.712	0.000	112.712	-	-
TOTAL	579.989	444.504	1024.580	-	-

Source: Libros de Apeo y Repartimiento, 1572. Mise en forme: García Martínez (1999), modifiée

Cultures et occupation du sol en 1572 (ha)

Annexe 3 : Occupation du sol en 1752

Commune	Regadío	Secano	TOTAL surface cultivée	Terres non cultivées et / ou non agricoles ^{xi}	TOTAL
Lanjarón	173.17	354.78	527.95	5049.34	5577.29
Cañar	425.20	123.65	548.85	1024.39	1573.24
Soportújar	511.79	260.92	772.71	628.05	1400.76
Carataunas	39.39	110.24	149.63	-	149.63
Pampaneira	163.46	62.2	225.66	-	225.66
Bubión	187.51	44.96	232.47	135.37	367.84
Capileira	477.31	42.82	520.13	-	520.13
La Tahá	139.51	142.98	282.49	78.65	361.14
Pórtugos	70.25	365.05	435.30	14.63	449.93
Busquístar	178.88	152.53	331.41	1402.44	1733.85
Trevélez	75.50	580.64	656.14	64.93	721.12
TOTAL	2442.02	2240.77	4682.79	8442.50	13125.29

Source: Catastro de Ensenada, Respuestas Particulares, 1752. Mise en forme : García Martínez (1999)

Cultures et occupation du sol en 1752 (ha)

Annexe 4 : Occupation du sol en 1855/61

Commune	Regadío	Secano	TOTAL surface cultivée	Terres non cultivées et / ou non agricoles ^{xii}	TOTAL
Lanjarón	602.53	209.77	812.30	-	-
Cáñar	-	-	-	-	-
Soportújar	447.59	340.75	788.34	-	-
Carataunas	-	-	-	-	-
Pampaneira	-	-	-	-	-
Bubión	402.48	0.00	402.48	-	-
Capileira	1020.56	0.00	1020.56	-	-
La Tahá	-	-	-	-	-
Pórtugos	107.34	108.48	215.82	-	-
Busquístar	261.70	212.50	474.20	-	-
Trevélez	224.88	899.05	1123.93	-	-
TOTAL	3067.08	1770.55	4837.63	-	-

Source: Amillaramientos, 1855/61. Mise en forme : García Martínez (1999)

Cultures et occupation du sol en 1855/61

ⁱ Pour les communes de la Alta Alpujarra (García Martínez, 1999), la surface agricole est divisée dans les catégories suivantes: terres irriguées (regadío) de vega (autour des villages), terres irriguées de sierra (en altitude), terres non irriguées (secano) et vignes irriguées et non irriguées. A cela s'ajoute un nombre varié d'arbres fruitiers et autres types d'arboriculture : mûrier, olivier, noyer, châtaignier (Libros de Apeo y Repartimiento, 1572) ; regadío (vega), regadío sierra (mais pas toujours), vignes irriguées, secano, vignes non irriguées (Respuestas Particulares del Catastro de Ensenada, 1752) ; terres irriguées en jachère (vega), oliviers irrigués, châtaigniers irrigués, orangers, regadío sierra, sierra annuel, irriguée une année sur deux, secano, vignes, secano sierra (Amillaramientos, 1855/61).

ⁱⁱ A ce sujet, il faut tenir compte de la légère différence entre la surface municipale totale, calculée à partir des cartes digitalisées, et de la surface des terres cultivées (regadío et secano) – donnée extraite des différentes sources historiques.

ⁱⁱⁱ Las Respuestas Particulares del Catastro del Marqués de la Ensenada.

^{iv} Selon le cadastre de 1995 (Catastro de Rústica) la surface cadastrée des onze communes est de 34832.70 ha alors que les sources cadastrales de 1752 n'indiquent que 13125.29 ha (seulement 37.68 % de la surface totale). La surface calculée à partir de la base de données SIG est de 34939.42 ha.

^v Il convient de préciser que le réseau d'irrigation actuel (inclus dans le SIG) a subi une série de transformations durant la période analysée. Si le réseau d'origine a été effectivement créé durant la période d'occupation arabe (avant 1492), il a fait l'objet d'une extension durant le 18^{ème} siècle. Pour plus de détails sur ce système hydraulique complexe, cf. l'article de Delaigue (1995).

^{vi} Parcelles non emblavées chaque année.

^{vii} Puisque la cartographie de 1957 repose sur une photo-interprétation, nous avons comparé cette carte avec les données statistiques du « Cadastre de Rústica » de 1983. Il s'est alors révélé que les données statistiques agricoles de 1983 n'étaient pas actualisées et correspondent en fait à la situation de la fin des années 1950 et de la décennie 1960 (García Martínez, 1999, p.350).

^{viii} Communes de Lanjarón, Soportújar, Bubión, Capileira, Pórtugos, Busquístar et Trevélez.

^{ix} Pour la commune de La Tahá la taille de la propriété type n'est pas connue au lieu dit Alguastar – à l'époque une commune à part, regroupée par la suite. Ainsi les 5.5 propriétés réparties ne rentrent pas en ligne de compte pour le calcul de la surface totale.

^x Données manquantes dans les Libros de Apeo y Repartimiento.

^{xi} Données non cadastrées dans leur totalité en 1752.

^{xii} Données non cadastrées en 1855/61.